

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування

Кафедра хімії та фізики

05-06-58

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт
із навчальної дисципліни (за вибором)

«ОСНОВИ РАДІАЦІЙНОЇ ФІЗИКИ»

для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за
освітньо-професійною програмою «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 151
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної
та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з якості
ННІАКОТ
Протокол № 8 від 29.04.2020 р.

Рівне – 2020

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни «Основи радіаційної фізики» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Лебедь О. О., Гаращенко В. І., Рудик Б. П., Мислінчук В. О. – Рівне : НУВГП, 2020. – 52 с.

Укладачі: Лебедь О. О., канд. тех. наук, доцент кафедри хімії та фізики НУВГП;

Гаращенко В. І., канд. тех. наук, доцент кафедри хімії та фізики НУВГП;

Рудик Б. П., асистент кафедри хімії та фізики НУВГП;

Мислінчук В. О., канд. пед. наук, доцент кафедри методики викладання фізики та хімії РДГУ.

Відповідальний за випуск: Гаращенко В. І., к.т.н., доцент, завідувач кафедри хімії та фізики.

Керівник групи забезпечення спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Древецький В. В.

© Лебедь О. О.,
Гаращенко В. І.,
Рудик Б. П.,
Мислінчук В. О., 2020
© НУВГП, 2020

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕДМОВА.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. Визначення об'ємної активності β - випромінюючих нуклідів у воді.....	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. Визначення питомої активності ґрунту, забрудненому чорнобильськими викидами β - нуклідів.....	23
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. Визначення об'ємної активності радону в повітрі.....	36
ЛІТЕРАТУРА.....	49
Додаток 1.....	51
Додаток 2.....	52

ПЕРЕДМОВА

Курс “Основи радіаційної фізики” включає матеріал двох взаємопов’язаних дисциплін: “Радіаційна фізика” та “Дозиметрія і радіометрія” і ставить за мету дати поглиблені знання студентам із фізики іонізуючих випромінювань, а саме, із наступних розділів:

- види іонізуючих випромінювань та їх характеристики;
- взаємодія іонізуючих випромінювань з речовиною;
- вплив іонізуючих випромінювань на живу тканину;
- природна радіоактивність;
- ядерні реакції;
- практичне вимірювання характеристик іонізуючих випромінювань і різних фізичних процесів, при яких виникають ці випромінювання.

Завданням лабораторних робіт є вивчення методик вимірювань іонізуючих випромінювань та дозиметричних і радіометричних приладів.

Метою лабораторних робіт є також формування практичних навичок студентів у визначенні, за допомогою радіометричних та дозиметричних приладів, забрудненості природних середовищ (грунту, води, повітря) та продуктів харчування різними видами радіонуклідів. На основі отриманих даних давати оцінки можливості використання таких природних середовищ та продуктів харчування у життєдіяльності.

В результаті виконання лабораторної роботи студент оформляє звіт за зразком, поданим у додатках 1 та 2 і відповідає на контрольні запитання до роботи.

Дані методичні вказівки підготовлені для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології».

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМНОЇ АКТИВНОСТІ β- ВИПРОМІНЮЮЧИХ НУКЛІДІВ У ВОДІ

Мета роботи: навчитися працювати на радіометрі РЖС-05 та визначити об'ємну активність проби води з присутніми в ній бета-активними джерелами.

Теоретичні відомості

Існують три види бета-розпаду: бета "-" – розпад, бета "+" – розпад і електронне захоплення. При бета "-" – розпаді з ядра вилітає електрон. За законом збереження електричного заряду при такому розпаді утворюється ядро, яке в таблиці Менделєєва розміщене на одну клітинку праворуч від материнського ядра. Наприклад,



Тут ${}_{-1}^0e$ – символ електрона; $\tilde{\nu}$ – символ антинейтрино, частинки, що супроводжує бета "-" – розпад (нейтральної фундаментальної частинки). ${}_{38}^{90}\text{Sr}$ (стронцій) є широко поширеним продуктом поділу ${}_{92}^{235}\text{U}$ (уран). Він зустрічається в забрудненнях, зумовлених викидами атомних електростанцій, і має період напіврозпаду 28,8 років. Електронів, які утворюються при цьому розпаді, в ядрі нема. Вони утворюються в результаті перетворення одного з нейтронів ядра в протон, електрон і антинейтрино:



При бета "+" – розпаді з ядра вилітає позитрон – античастинка до електрона. Наприклад,



де ν – символ нейтрино, частинки, яка є античастинкою до антинейтрино. Отже, в результаті бета "+" – розпаду утворюється ядро, яке в таблиці Д. І. Менделєєва розміщене на одну клітинку ліворуч від материнського ядра. Позитрон і

нейтрино утворюються в результаті перетворення одного з протонів ядра



При електронному захопленні ядро захоплює один з електронів атома (найчастіше з K -оболонки, тому його часто називають також K -захопленням). При цьому відбувається ядерне перетворення. Наприклад,



При електронному захопленні утворюється ядро, яке в таблиці Д. І. Менделєєва розміщене на одну клітинку ліворуч від материнського ядра. Один з протонів ядра захоплює електрон і перетворюється в нейтрон



Електрони і позитрони, які утворюються при бета-розпаді називаються бета-частинками (бета "-", або "+"). Бета-частинки можуть мати значну енергію (понад 10MeV) і є безпосередньо-іонізуючими частинками. Нейтрино і антинейтрино, які також утворюються при β -розпаді, дуже слабо взаємодіють з речовиною.

Бета-частинки мають певний розподіл за енергіями або спектр. За своїм характером спектри бета-частинок є неперервними, що в історичному аспекті було дуже складно пояснити. Для пояснення даного факту Паулі в 1930 році висловив гіпотезу, що в процесі β -розпаду з ядра, крім β -частинки, вилітає незаряджена частинка з дуже малою масою, яка була названа нейтрино. Далі виявилось, що існує і інша подібна на нейтрино, але все-таки відмінна частинка антинейтрино. Існування простого неперервного спектру пояснюється тим, що при бета-розпаді завжди виділяється одна і та ж енергія E_m , але вона випадковим способом ділиться між β -частинкою і нейтрино або антинейтрино. На рис. 1 представлений такий спектр.

Величина $I(E)$ є дослідна інтенсивність потоку бета-частинок

$$I(E) = \frac{\Delta N}{\Delta E}, \quad (7)$$

де ΔN – є кількість β -частинок за одиницю часу, які мають енергії в інтервалі від E до $E+\Delta E$. Отже, величина $I(E)$ дорівнює кількості β -частинок за одиницю часу, що припадає на одиницю енергії в інтервалі ΔE . E_m – максимальна енергія бета-частинок, яку називають максимальною енергією бета-спектру. Характерним для бета-спектру є плавність кривої (відсутність піків), наявність чіткого максимуму, а також наявність максимальної енергії E_m , якою спектр обмежений зі сторони великих енергій.

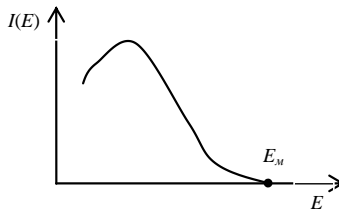


Рис. 1. Залежність інтенсивності $I(E)$ бета-спектру від енергії β -частинок E .

Використовуючи закон збереження енергії, Фермі обчислив інтенсивність потоку бета-спектру

$$I(E) = B \cdot N_0 \cdot \sqrt{E(E + 2mc^2)} \cdot (E + 2mc^2) \cdot (E_m - E), \quad (8)$$

де B – деяка стала, N_0 – загальна кількість бета-частинок, m – маса спокою бета-частинки, E – її релятивістська кінетична енергія.

Бета-стабільність ядер визначається їх енергією зв'язку. Вайцзекер записав емпіричну формулу для енергії зв'язку ядра

$$E_{зв} = a_1 \cdot A - a_2 \cdot A^{2/3} - a_3 \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_4 \cdot \frac{(A - 2Z)^2}{A} - a_5 \cdot \frac{\delta}{A^{3/4}}, \quad (9)$$

де $a_1 - a_5$ – універсальні постійні величини: $a_1 = 15,75 \text{ MeV}$, $a_2 = 17,8 \text{ MeV}$, $a_3 = 0,710 \text{ MeV}$, $a_4 = 23,7 \text{ MeV}$, $a_5 = 34 \text{ MeV}$; $\delta = 1$ для непарно-непарних ядер, $\delta = 0$ для ядер з непарним A , $\delta = -1$ для парно-парних ядер.

При бета-розпаді змінюється зарядове число ядра Z без зміни масового числа A . Ядро буде стабільним в тому випадку, коли енергія зв'язку ядра максимальна, тобто не залежить від Z . З формули (9) для ядер з непарним A (коли $\delta = 0$) залежність енергії зв'язку від Z при постійній величині A визначається сумою третього і четвертого членів в (9)

$$S = \frac{a_3 \cdot Z^2}{A^{1/3}} + \frac{a_4 \cdot (A - 2Z)^2}{A}. \quad (10)$$

Щоб енергія зв'язку була максимальною, величина S повинна бути мінімальною. Аналізуючи S на мінімум $\left(\frac{dS}{dZ} = 0\right)$, отримаємо

$$Z_{\text{рівн}} = \frac{2a_4 \cdot A}{a_3 \cdot A^{2/3} + 4a_4}. \quad (11)$$

Формула (11) визначає рівноважне зарядове число ядра, при якому ядро стабільне по відношенню до бета-розпаду. При $Z > Z_{\text{рівн}}$ ядро нестабільне по відношенню до бета⁺-розпаду і електронного захоплення, оскільки ці два види розпаду зменшують Z і наближають його до рівноважного значення. При $Z < Z_{\text{рівн}}$ ядро нестабільне по відношенню до бета⁻-розпаду. У цьому випадку при розпаді Z збільшується і наближається до рівноважного значення. $a_3 \ll a_4$ ($a_3 = 0,710 \text{ MeV}$, $a_4 = 23,7 \text{ MeV}$). Тому при незначних великих A з (11) отримаємо $Z_{\text{рівн}} \approx A/2$, тобто в бета-стабільних ядрах при непарному A кількість протонів і нейтронів в ядрі повинна бути приблизно однаковою.

Якщо A – величина парна, то ядро може бути або парно-парним, або непарно-непарним, і при аналізі стабільності треба враховувати п'ятий член (9). Якщо враховувати тільки цей член, то бета-стабільними повинні бути парно-парні ядра, оскільки цей член в енергії зв'язку буде позитивним ($\delta = -1$), що призводить до збільшення енергії зв'язку і стабільності ядра. Якщо ядро є непарно-непарним, то при зміні Z на одиницю величина δ змінюється з +1 на -1, тобто енергія зв'язку зростає. Але на енергію зв'язку впливають і інші члени, які входять у величину S (10). Дія цих факторів призводить до того, що бета-

нестабільними є майже всі непарно-непарні ядра за виключенням ${}^2_1\text{H}$, ${}^6_3\text{Li}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{14}_7\text{N}$.

При радіоактивному розпаді кількість ядер речовини, що розпадаються, зменшується з часом згідно з законом радіоактивного розпаду

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (12)$$

де N_0 – початкова кількість ядер, N – кількість ядер через проміжок часу dt , λ – постійна радіоактивного розпаду

$$\lambda = \ln 2 / T \quad (13)$$

(T – період напіврозпаду).

З формули (12) випливає, що кількість ядер, які розпадаються за проміжок часу dt : $dN_p = N \lambda dt$.

Активністю називається кількість розпадів за одиницю часу

$$A = dN_p / dt = N \lambda = N \cdot \ln 2 / T. \quad (14)$$

З (14) видно, що активність пропорційна кількості наявних ядер і обернено пропорційна періоду напіврозпаду.

Активність в системі *CI* вимірюється в бекерелях (*Бк*). *1Бк* – це така активність елемента, коли відбувається 1 його розпад за секунду. Активність також вимірюється в позасистемних одиницях – Кюрі (*Ки*). $1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Бк}$. 1Ки – є активність ${}^{226}_{88}\text{Ra}$.

Активність радіоактивних матеріалів прийнято характеризувати питомою і об'ємною активністю. Питома активність є активність одиниці маси речовини

$$A_m = \frac{A}{m}, \quad (15)$$

де m – маса речовини. Об'ємна активність є активність одиниці об'єму

$$A_v = \frac{A}{V} \quad (16)$$

(V – об’єм зразка). Поняття A_m і A_v мають зміст, коли радіонукліди розподілені в речовині приблизно рівномірно. Питома активність в системі СІ вимірюється в $Bк/кг$ і позасистемних одиницях $Ki/кг$. Об’ємна активність вимірюється відповідно в $Bк/м^3$, $Ki/м^3$, а також $Bк/л$, $Ki/л$.

Активність вимірюється радіометрами. Детектор радіометра фіксує іонізуюче випромінювання, яке виникає при радіоактивному розпаді, в результаті чого видає електричні імпульси. Їх кількість за одиницю часу (швидкість лічби) пропорційна активності проби. Можливий і інший принцип роботи радіометра, коли струм детектора пропорційний активності проби.

Нехай використовується радіометр з детектором першого виду. Тоді активність (повна, питома, об’ємна, поверхнева)

$$A = \frac{H_n}{P}, \quad (17)$$

де H_n – швидкість лічби детектора, зумовлена випромінюванням проби, P – чутливість радіометра до випромінювання певного нукліда (постійна для даного детектора величина).

Слід врахувати, що радіометр фіксує одночасно імпульси як від проби, так і від фону, тобто $H_n = H_z - H_\phi$. Тут H_z – швидкість лічби радіометра в результаті дії випромінювання проби і фонового, H_ϕ – швидкість лічби фонового випромінювання.

При вимірюванні радіометром допускається деяка похибка, оскільки величина H_n змінюється внаслідок статистичних флуктуацій (статистична похибка). Крім того, чутливість P також визначена з певною похибкою (приладова похибка). Якщо позначити точні значення H_n і P через H_{0n} і P_0 , то можна записати $H_n = H_{0n} \pm \Delta H_n$ і $P = P_0 \pm \Delta P$. Тут ΔH_n і ΔP – похибки вимірювань величин H_n і P . Ці похибки можна вважати достатньо малими відносно величин H_n і P .

Підставляючи останні вирази в (17), розкладаючи в ряд за степенями ΔP і обмежуючись лише членами нульового та першого порядку відносно ΔH_n і ΔP , отримаємо

$$A = \frac{H_n}{P_0} - \frac{(P - P_0)H_{0n}}{P_0^2}. \quad (18)$$

Оскільки величини H_n і P – випадкові, то активність A є також випадковою величиною. Будемо вважати, що вони підлягають розподілу Гауса. Тоді з (18) знайдемо дисперсію величини A

$$DA = \frac{DH_n}{P_0^2} + \frac{H_{0n}^2 \cdot DP}{P_0^4}. \quad (19)$$

Похибка активності

$$\Delta A = \sigma_A \cdot t_i = \sqrt{DA} \cdot t_i, \quad (20)$$

де t_i – параметр інтеграла ймовірності, який залежить від ймовірності попадання точного значення A в довірчий інтервал $A \pm \Delta A$, σ_A – середньоквадратичне відхилення величини A .

З формул (19), (20) випливає, що для обчислення похибки необхідно знати точні значення величин H_n і P , які невідомі. Для оцінки точних значень при обчисленні похибок можна використовувати виміряні значення.

Знайдемо відносну похибку активності з

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\varepsilon_{cm}^2 + \varepsilon_{np}^2}, \quad (21)$$

де ε_{cm} – відносна статистична похибка активності

$$\varepsilon_{cm} = \frac{\sqrt{DH_n} \cdot t_i}{H_n}, \quad (22)$$

ε_{np} – відносна приладова похибка активності

$$\varepsilon_{np} = \frac{\sqrt{DP} \cdot t_i}{P}. \quad (23)$$

Відносну приладову похибку можна взяти з паспорту приладу за формулою

$$\varepsilon_{np} = \varepsilon_0 \frac{t_i}{t_0}, \quad (24)$$

де ε_0 – відносна паспортна приладова похибка величини P , яка задана з надійністю, для якої значення інтеграла ймовірності рівне t_0 .

На статистичну похибку суттєво впливає час вимірювань і його розподіл між вимірюванням випромінювання фону і проби разом з фоном.

Математично можна отримати, що при фіксованому часі $t = t_z + t_\phi$ статистична похибка буде мінімальною при виконанні умови

$$\frac{t_z}{t_\phi} = \frac{\sqrt{H_z}}{\sqrt{H_\phi}}, \quad (25)$$

де t_ϕ – час вимірювання фону, t_z – час вимірювання проби разом з фоном, H_ϕ – швидкість лічби фону, H_z – швидкість лічби проби разом з фоном.

Будова приладу

Радіометр РЖС-05 призначений для вимірювання об'ємної активності бета- та альфа-активних нуклідів у пробах рідини. Він застосовується для радіаційного контролю природних водойм, басейнів очисних споруд, а також технологічних рідин на радіохімічних підприємствах та АЕС.

Блок-схема приладу представлена на рис. 2.

При наявності радіоактивних випромінювань, що виникають внаслідок розпадів нуклідів проби, яка знаходиться разом із сцинтилятором в кюветі К, в сцинтиляторі виникає спалах світла (сцинтиляція). Кількість світлових квантів пропорційна енергії, переданої бета- або альфа-частинками сцинтилятору. Через світлові затвори СЗ це світло попадає на фотокатоди двох фотоелектронних підсилювачів ФЕП, у яких

кожна сцинтиляція викликає електричний імпульс. Імпульси від ФЕП подаються на схему співпадань ССП, яка виробляє імпульс лише при одночасному надходженні на неї імпульсів від обох ФЕП. Цим виключаються фонові імпульси від самих ФЕП.

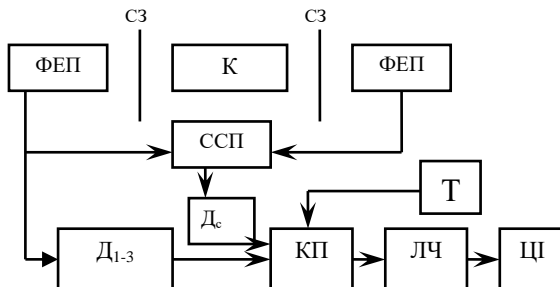


Рис. 2. Блок-схема РЖС-5

Імпульси від ССП надходять в дискримінатор D_c який пропускає лише імпульси, що перевищують певний заданий рівень (рівень дискримінації). Цим також відсікаються шуми ФЕП.

Крім того, імпульси від одного ФЕП паралельно подаються на 3 дискримінатори D_{1-3} , з рівнями дискримінації, величина яких збільшується з номером дискримінатора (канала). Оскільки енергія випромінювання нуклідів відрізняється, то величина електричного імпульсу від них також буде різною. Це дозволяє збільшити відношення $\frac{\text{ефект від проби}}{\text{ефект від фону}}$ (ефект/фон)

окремих нуклідів, вимірюючи число імпульсів N в різних каналах (D_c , D_1 , D_2 , D_3), або різницю чисел імпульсів в каналах ($N(D_c) - N(D_1)$; $N(D_c) - N(D_2)$; $N(D_c) - N(D_3)$).

При настройці радіометра порогова напруга дискримінатора D_1 встановлюється вище амплітуди імпульсів, зумовлених випромінюванням тритію, порогова напруга дискримінатора D_2 – вище амплітуди імпульсів від випромінювання вуглецю-14. Порогова напруга дискримінатора D_3 встановлюється на такому рівні, при якому швидкість лічби від фонового випромінювання становить 3-4 *имп./с*.

Якщо, наприклад, в пробі є нукліди з низькою енергією випромінювання (третій), то відношення ефект/фон можна збільшити дією $N(D_c) - N(D_1)$. Якщо в пробі є низка нуклідів, з енергіями випромінювання, що відрізняються в 5-10 разів, можна провести їх ідентифікацію. Тому в приладі передбачена можливість виводити на індикатори різниці $N(D_c) - N(D_1)$, $N(D_c) - N(D_2)$, $N(D_c) - N(D_3)$.

Імпульси від дискримінатора подаються на керуючий пристрій КП, який управляється таймером Т. Таймер задає час, на протязі якого імпульси від ССП проходять на лічильник імпульсів ЛЧ. Результати лічби за певний проміжок часу, що задається таймером, відображаються на цифровому індикаторі ЦІ.

Загальні зауваження відносно роботи приладу

1. Лічильний пристрій складається з чотирьох каналів набору і зберігання інформації (η , 1, 2, 3). Набір імпульсів в лічильники-накопичувачі ведеться одночасно в усіх каналах.
2. У початковий стан лічильний пристрій встановлюється при натисканні кнопки «СБРОС». Набір імпульсів в лічильники-накопичувачі починається після натискання кнопки «Пуск». Зупинка лічби відбувається автоматично через проміжки часу 1, 10, 100, 1000с, що задається перемикачем «ЭКСПОЗИЦИЯ». Зупинити лічбу можна також кнопкою «СБРОС».
3. Одночасно з набором інформації в лічильники-накопичувачі імпульси потрапляють на лічильник індикаторного вузла. Процес набору імпульсів можна спостерігати в одному з вимірювальних каналів. Канал, з якого інформація виводиться на цифровий індикатор, встановлюється перемикачем «СЧИТЫВАНИЕ».
4. Інформація про результати вимірювання може бути почергово виведена з лічильників-накопичувачів всіх каналів на цифровий індикатор, але не безпосередньо, а у вигляді різниці. Для цього в положенні «№1» перемикача «СЧЕТ» необхідно вирахувати швидкість лічби імпульсів фону N_{ϕ} , в положенні «№2» швидкість лічби імпульсів від проби і фону

$N_{np+\phi}$. Тоді в положенні перемикача «СЧЕТ» – «№2–№1» і натисканні кнопки «СЧИТЫВАНИЕ» виводиться величина

$$N_{np} = N_{np+\phi} - N_{\phi} \quad (26)$$

Така операція може бути виконана у всіх каналах η , 1, 2, 3 (визначається положенням перемикача «СЧИТЫВАНИЕ»).

5. Активність проби визначається за формулою

$$A = \frac{N_{np}}{S_{pc}} = \frac{N_{np+\phi} - N_{\phi}}{S_{pc}} \quad (27)$$

де S_{pc} – чутливість радіометра до випромінювання даного нукліда $Bk^{-1}c^{-1}$; $N_{np+\phi}$ – швидкість лічби імпульсів, зареєстрованих радіометром від випромінювання нуклідів в досліджуваній пробі і фону; N_{ϕ} – швидкість лічби імпульсів, обумовлених фоновим випромінюванням. Час вимірювання імпульсів від фонові і досліджуваної проб повинен бути однаковим.

6. Вимірювання на нижній ділянці діапазону (вимірювання малих концентрацій нуклідів) повинні проводитись в захисті.

7. Для виведення на цифровий індикатор різниці η -1, η -2, η -3 необхідно перемикач «СЧЕТ» поставити в положення «№1» або «№2», перемикач «СЧИТЫВАНИЕ» – у відповідне положення. Після цього кнопками «СБРОС», «ПУСК» запустити установку на підрахунок числа імпульсів. Після закінчення часу експозиції на цифровому індикаторі з'явиться відповідна різниця. Для величин η -1, η -2, η -3 можна знаходити величину N_{np} згідно з п. 4.

8. Сцинтилятор не можна тривалий час засвічувати. Кювета, в якій є сцинтилятор, повинна бути закрита світлонепроникними кришками. Сцинтилятор, повністю ізольований від світла, «висвічується» за 10-15 хвилин до рівня, при якому похибка вимірювання не перевищує основної.

9. Наявність у воді домішок потребує корекції чутливості. Вимірювання детектором з плівки-стрічки ускладнюється, якщо в пробі присутні хімічні домішки, завислі частинки, або змінюється її колір. Наявність в пробі завислих частинок в

кількості 50мг/л або зміна її кольору на 80° практично не впливає на результат вимірювань. При більшій кількості домішок в пробі, або зміні її кольору необхідно провести корекцію чутливості за гамма-випромінюванням контрольного джерела цезію-137, що входить в комплект радіометра. Перемикачем «КОРРЕКЦИЯ» чутливість збільшується до рівня, при якому швидкість лічби від контрольного джерела буде дорівнювати значенню, наведеному в паспорті радіометра.

10. Необхідно запобігати забрудненню чутливого елемента детектора (плівки-стрічки). Якщо в пробі присутні хімічні домішки, завислі частинки, або її активність перевищує діапазон вимірювання, на поверхні детектора в процесі його експлуатації накопичуються забруднюючі речовини. Це приводить до зниження чутливості і підвищення рівня фону. Для зменшення сорбції в посудину з досліджуваною пробой необхідно вводити азотну кислоту в кількості, достатній для створення кислотності $\text{pH}=3$.

Якщо передбачувана активність проби перевищує діапазон вимірювання, її необхідно розбавити до допустимої концентрації.

11. Після закінчення вимірювань проба повинна бути злита, а детектор промитий не менше, як трьома об'ємами чистої води (1,5-2л). При необхідності детектор промивається розчинами миючих порошків типу «Защита-І», «СФ-ЗІС (сульфіт)» тощо. У випадку сильного забруднення детектор потрібно опустити на 3-5с в свіжий контракт Петрова, розбавленого водою у відношенні 1/10, а після цього промити водою. Достатні очисні результати дає механічна очистка детектора. Детектор виймають з кювети, розгортають і поміщають між двома поролоновими губками. Злегка стискаючи губки, потрібно протягнути через них плівку-стрічку. Після промивки або очистки детектора перевіряють його чутливість за контрольним джерелом – цезію-137.
12. Для більшої концентрації альфа- активних ядер на зернах порошка сорбента-сцинтилятора кислотність проби повинна дорівнювати $\text{pH} = 7$, а порошок повинен бути старанно

перемішаний у воді. Порошок сцинтилятора використовується одночасно і як сцинтилятор і як агент, що сорбує на собі іони важких хімічних елементів.

Перевірка роботи радіометра РЖС-05

При перевірці від внутрішнього генератора перевіряється працездатність всіх вузлів радіометра за виключенням ФЕП і перетворювачів напруги до нього.

1. Встановити перемикачі на блоці детектування в наступні положення: «ИЗМЕРЕНИЕ» – в положення «КОНТРОЛЬ», «КОРРЕКЦИЯ» – в положення «I».
2. Встановити перемикачі на передній панелі лічильного пристрою «СЧЕТ» – в положення «№1»; «СЧИТЫВАНИЕ» – в положення «Σ»; «ЭКСПОЗИЦИЯ» в положення «I».
3. Натиснути послідовно кнопку «СБРОС», «ПУСК». На табло загориться індикатор лічби, а на цифровому табло почнеться відлік імпульсів від внутрішнього генератора. Після автоматичної зупинки лічби на цифровому табло висвітиться число 640 ± 10 .
4. Встановити перемикач «СЧЕТ» в положення «№2»; «ЭКСПОЗИЦИЯ» – в положення «10».
5. Натиснути кнопки «СБРОС», та «ПУСК». Після автоматичної зупинки лічби на цифровому індикаторі висвітиться цифра 6400 ± 10 .
6. Встановити перемикач «СЧЕТ» в положення «№2–№1», натиснути кнопку «СЧИТЫВАНИЕ». На цифровому індикаторі висвітиться число 5760 ± 110 (різниця між другим і першим вимірюваннями).

Перевірка радіометра за гамма-випромінюванням контрольного джерела цезію-137

**УВАГА!. ВИЙМАТИ КЮВЕТИ З БЛОКА
ДЕТЕКТУВАННЯ МОЖНА ЛИШЕ ПРИ ЗАКРИТИХ
СВІТЛОЗАТВОРАХ.**

7. Помістити детектор з плівки-стрічки в кювету. Встановити кювету в блок детектування так, щоб площадка на циліндричній поверхні була напрямлена в гору.

8. Встановити перемикачі: «ИЗМЕРЕНИЕ» в положення « $\beta 1$ » і «КОРРЕКЦИЯ» – в положення «I»; «СЧЕТ» – в положення «№1»; «ЭКСПОЗИЦИЯ» – в положення «I», *имп./с*; «Считывание» – в положення « Σ ».
9. Помістити контрольне джерело на кювету. Натиснути послідовно «СБРОС», «ПУСК». Після автоматичної зупинки лічби записати покази цифрового табло. Повторити це вимірювання декілька разів і знайти середнє значення вимірюваного числа імпульсів. Воно повинно співпадати з паспортним значенням.

Вимірювання об'ємної активності нуклідів за бета-випромінюванням детектором з плівки-стрічки

УВАГА! ПЕРЕД ВИЙМАННЯМ КЮВЕТ З БЛОКА ДЕТЕКТУВАННЯ ОБОВ'ЯЗКОВО ЗАКРИТИ ОБИДВА СВІТЛОЗАТВОРИ.

1. Залити в кювету 0,55л дистильованої води і щільно закрити її кришкою. Встановити кювету в блок детектування. Відкрити світлозатвори.
2. Включити радіометр. Встановити перемикачі «ИЗМЕРЕНИЯ» в положення « $\beta 1$ »; «КОРРЕКЦИЯ» – в положення «I»; «СЧЕТ» – в положення «I».
3. Встановити час експозиції в залежності від швидкості лічби від досліджуваної проби. Час лічби повинен бути по можливості більшим. Його орієнтовно можна визначити з таблиці 1.
4. Натиснути послідовно «СБРОС», «ПУСК». На цифровому табло почнеться відлік кількості імпульсів фону $N_{\text{ф}}$. Після автоматичної зупинки на цифровому табло буде записане значення цієї величини.
5. Закрити світлозатвори. Дістати кювету з блока детектування і злити з неї фонову воду.
6. Залити в кювету 0,55л досліджуваної рідини і встановити її в блок детектування. Відкрити світлозатвори.
7. Перемикач «СЧЕТ» встановити в положення «№2». Натиснути послідовно «СБРОС», «ПУСК». Після

автоматичної зупинки лічби на цифровому індикаторі з'явиться число $N_{\text{пр+ф}}$.

8. Перевести перемикач «СЧЕТ» в положення «№2-№1». Натиснути кнопку «СЧИТЫВАНИЕ». На цифровому табло з'явиться число. $N_{\text{пр}}$. Записати його.
9. За формулою (27) знайти активність досліджуваної проби.
10. Закрити світлозатвори, вимкнути радіометр. Дістати кювету, злити пробу і ретельно промити детектор і кювету чистою водою.
11. Якщо в досліджуваній пробі є завислі частинки або вона має колір, то необхідно провести корекцію чутливості за гамма-випромінюванням контрольного джерела. Для цього необхідно покласти на площадку на зовнішній стороні кювети контрольне джерело. Послідовно встановлюючи перемикачі «КОРРЕКЦИЯ» в положення «1, 2, 3,...», «ИЗМЕРЕНИЯ» – в положення – « $\beta 2$ », « $\beta 3$ » знайти таке їх положення, коли швидкість лічби від контрольного джерела буде такою ж, як і з пробой дистильованої води. Забрати джерело і провести вимірювання швидкості лічби від досліджуваної проби.

Хід роботи

1. Користуючись описом радіометра РЖС-05 ознайомитись з призначенням приладу, технічними даними і принципом його роботи (1.1-1.3).
2. Користуючись описом роботи радіометра РЖС-05 для нукліда, якого вказує викладач, розчиненого у воді, вибрати канал, на якому краще проводити вимірювання.
3. За описом приладу РЖС-05 ознайомитись з методикою вимірювання об'ємної активності нуклідів за бета-випромінюванням детектором з плівки-стрічки (1.4).

УВАГА! НЕ МОЖНА ВМИКАТИ ПРИЛАД АБО ВИЙМАТИ КЮВЕТУ ПРИ ВІДКРИТИХ СВІТЛОЗАТВОРАХ.

4. Закрити світлозатвори. Після допуску до роботи провести перевірку роботи радіометром згідно з параграфом 1.3 опису

- приладу. При виконанні п. 7 (1.4), вимірювання можна проводити лише через 15хв. після того, як сцинтилятор був на світлі (для його висвічування).
5. Приготувати робочий розчин. Закрити світлозатвори і вийняти кювету. Наповнити кювету робочим розчином і щільно загвинтивши кришки, витерти кювету.
 6. Поставити кювету з робочим розчином в прилад плоскою стороною вгору і висвітити сцинтилятор на протязі 15хв.
 7. Відкрити світлозатвори і зробити грубе вимірювання числа імпульсів від проби на протязі 100с.
 8. Знайти швидкість лічби від випромінювання проби разом з фоном H_3 .
 9. Користуючись орієнтовним значенням швидкості лічби фону H_ϕ на даному каналі, заданою приладовою похибкою градування чутливості 15% (при надійності 0,95), загальною похибкою вимірювання (задається викладачем), за формулою $H_n = H_3 - H_\phi$, а також формулами 22–25 обрахувати час t_3 вимірювання випромінювання від проби разом з фоном і t_ϕ випромінювання фону.
 10. Виміряти число імпульсів проби разом з фоном на протязі обрахованого часу t_3 . Знайти робоче значення H_3 .
 11. Закрити світлозатвори. Вийняти кювету, злити робочий розчин. Промити кювету водопровідною водою (не менше 3-х об'ємів кювети). Після цього промити кювету 1 об'ємом дистильованої води.
 12. Заповнити кювету дистильованою водою, щільно загвинтити кришку. Витерти кювету і поставити прилад плоскою стороною вгору. Висвітити сцинтилятор на протязі 15хв.
 13. Відкрити світлозатвори. Виміряти число імпульсів, зумовлене випромінюванням фону на протязі розрахованого часу t_ϕ . Обчислити робоче значення H_ϕ .
 14. За формулою 18 обчислити об'ємну активність проби.

15. Закрити світлозатвори, вимкнути прилад, зняти кювету і злити фонову воду. Витерти кювету і поставити її для просушки в сушильну шафу. Привести в порядок робоче місце.
16. За формулами 21–24 знайти відносну і абсолютну похибки вимірювання. Записати результат вимірювання з похибкою.

Контрольні запитання

1. Які існують види бета-розпаду?
2. Що таке бета«-» - розпад? В чому полягає правило зміщення при бета «-» - розпаді? Записати відповідну реакцію.
3. Яке внутрішньонуклонне перетворення відбувається при бета «-» - розпаді?
4. Що таке бета «+» - розпад? В чому полягає правило зміщення при бета «+» - розпаді? Записати відповідну реакцію.
5. Яке внутрішньонуклонне перетворення відбувається при бета «+» - розпаді?
6. Що таке електронне захоплення? В чому полягає правило зміщення при електронному захопленні? Записати відповідну реакцію.
7. Яке внутрішньонуклонне перетворення відбувається при електронному захопленні?
8. Що таке функція розподілу бета-частинок за енергіями? Як вона залежить від енергії частинок?
9. Як пояснюється неперервність розподілу бета-частинок за енергіями? В чому полягають основні властивості нейтрино і антинейтрино?
10. Що таке слабка взаємодія? Який радіус цієї взаємодії і що він означає?
11. Яка умова повинна виконуватись для бета-стабільних ядер з непарним A ?

Таблиця 1.

Прийближні контрольні рівні сумарного вмісту
радіонуклідів Cs-137, Cs-134, Sr-90 в питній воді та харчових
продуктах м. Рівного на 2010 р.

№ п/п	Назва продуктів	Контрольні рівні	
		<i>Ki/кг</i> <i>(Ki/л)</i>	<i>Бк/кг</i> <i>(Бк/л)</i>
Вміст Cs-137, Cs-134			
1.	Вода питна	$5 \cdot 10^{-10}$	18,5
2.	Молоко	$3 \cdot 10^{-9}$	185
3.	Кисломолочні продукти (сметана, різні види сирів)	$3 \cdot 10^{-9}$	185
4.	Масло вершкове, молоко згущене, концентроване	$1 \cdot 10^{-8}$	370
5.	Молоко сухе, незбиране	$1 \cdot 10^{-8}$	370
6.	М'ясо (свинина, баранина, птиця), риба	$1,6 \cdot 10^{-8}$	600
7.	Яловичина	$3 \cdot 10^{-8}$	1010
8.	М'ясо диких тварин: лось, косуля, кабан	$8 \cdot 10^{-8}$	2960
9.	Жири рослинні, тваринні, маргарин	$1 \cdot 10^{-8}$	370
10.	Картопля, коренеплоди, овочі, фрукти, ягоди, зелень	$1,6 \cdot 10^{-8}$	600
11.	Хліб, хлібопродукти, крупи, цукор, мука	$1,6 \cdot 10^{-8}$	600
12.	Продукти з овочів, ягід, фруктів, мед, сухофрукти, гриби всіх видів (сухі, свіжі, консервовані)	$1,6 \cdot 10^{-8}$	600
13.	Дитяче харчування	$1 \cdot 10^{-9}$	37
Вміст стронцію-90			
1.	Вода питна	$1 \cdot 10^{-10}$	3,7
2.	Молоко та продукти його переробки	$1 \cdot 10^{-9}$	37
3.	Овочі всіх видів, гриби	$1 \cdot 10^{-9}$	37
4.	Дитяче харчування	$5 \cdot 10^{-10}$	18,5

12. Чи можлива бета-стабільність непарно-непарних ядер? Чому?
13. Чи можлива бета-стабільність парно-парних ядер? Чому?
14. В чому полягає закон радіоактивного розпаду? Як пов'язана постійна λ розпаду з періодом напіврозпаду T ?
15. Що таке активність і в яких одиницях вона вимірюється?
16. Що таке питома і об'ємна активність? В яких одиницях вимірюються дані величини?
17. Пояснити будову і принцип роботи радіометра РЖС-05.
18. Як знаходиться об'ємна активність при вимірюванні її радіометром?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ АКТИВНОСТІ ҐРУНТУ, ЗАБРУДНЕНОМУ ЧОРНОБИЛЬСЬКИМИ ВИКИДАМИ β -РАДІОНУКЛІДІВ

Мета роботи: Ознайомитися та засвоїти методику визначення питомої активності ґрунтів за допомогою бета-радіометра “Бета”.

Теоретичні відомості

Основою атомної електростанції (АЕС) є ядерний реактор. В ньому відбувається поділ ядер урану під дією нейтронів (реакція типу (n, f)). Ядро урану захоплює нейтрон і ділиться на два осколки, які є ядрами елементів середини Періодичної таблиці елементів Менделєєва. Осколки поділу можуть бути елементами різних елементів, але найчастіше їх маси відносяться як 2:3. При кожному поділі ядра звільнюється також 2-3 нейтрони, які можуть захоплюватися іншими ядрами і викликати їх поділ. Таким чином відбувається *ланцюгова ядерна реакція*. При кожному поділі ядра виділяється енергія приблизно рівна 200MeV . Вона виділяється у вигляді кінетичної енергії осколків поділу, нейтронів, виділених при поділі, а

також енергії гамма-випромінювання і енергії, що виділяється при радіоактивному розпаді осколків.

Природний уран складається з ізотопів $^{238}_{92}\text{U}$ (99,27%), $^{235}_{92}\text{U}$ (0,72%) і $^{234}_{92}\text{U}$ (0,01%). Ядра $^{238}_{92}\text{U}$ діляться тільки нейтронами високих енергій ($E > 1,4\text{MeV}$), але переріз цієї реакції малий (порядку 1барн). Ядра $^{235}_{92}\text{U}$ діляться нейтронами будь-яких енергій, але особливо добре – повільними, тепловими нейтронами з енергіями $E = kT \approx 0,025\text{eV}$ (ефективний переріз цієї реакції 580барн). Ланцюгову реакцію з $^{235}_{92}\text{U}$ здійснити відносно легко, але для цього необхідно сповільнити нейтрони. Нейтрони, які вивільняються при поділі ядер урану мають неперервний розподіл за енергіями з максимумом біля 1MeV. Сповільнення нейтронів відбувається шляхом пружних і не пружних зіткнень з ядрами, які слабо поглинають нейтрони. Як сповільнювач в ядерних реакторах часто використовується звичайна вода (легководні реактори типу ВВЕР – Рівненська АЕС, Південно-Українська АЕС, Запорізьська АЕС тощо). Цей сповільнювач має і недолік, оскільки частина нейтронів поглинається ядрами звичайного водню



Для сповільнення використовується також важка вода, у якій звичайний водень ^1_1H замінений дейтерієм ^2_1H (важководні реактори). Дейтерій поглинає нейтронів значно менше, ніж звичайний водень.

Як сповільнювач використовується також графіт (вуглець) – в реакторах типу РВПК (Чорнобильська АЕС, Курська АЕС, Смоленська АЕС тощо). Вуглець складається з ізотопів $^{12}_6\text{C}$ (99%) і $^{13}_6\text{C}$ (1%), ядра вуглецю слабо взаємодіють з нейтронами (переріз захоплення теплового нейтрона 3мбарн). З цієї точки зору, графіт – хороший сповільнювач нейтронів. Але оскільки маса ядра в 12 разів більша маси нейтрона, то для сповільнення до теплових швидкостей необхідна більша кількість зіткнень.

При наявності сповільнювача ланцюгова реакція з ${}^{235}_{92}\text{U}$ може йти навіть при використанні природного урану. При цьому нейтрони будуть захоплюватись не тільки ${}^{235}_{92}\text{U}$, а і ${}^{238}_{92}\text{U}$. У більшості випадків це проходить за схемою реакції радіаційного захоплення:



Переріз радіаційного захоплення нейтроном ядра ${}^{238}_{92}\text{U}$ $\sigma_\gamma = 2,8 \text{ барн}$ для теплових нейтронів. Саме тому в природному урані нейтрон зустрічається з ядром ${}^{235}_{92}\text{U}$ в 140 разів рідше ніж з ядром ${}^{238}_{92}\text{U}$, але ймовірність поглинання його ядром ${}^{235}_{92}\text{U}$ з поділом останнього у $580/2,8 \approx 207$ разів більша. Тому в ядерному реакторі на природному урані в першу чергу буде вигоряти ${}^{235}_{92}\text{U}$, а кількість ${}^{238}_{92}\text{U}$ залишатиметься майже незмінною. Промислові реактори працюють не на природному урані, а на урані, збагаченому ізотопом ${}^{235}_{92}\text{U}$ (1,6-4,4%).

Ланцюгова реакція може йти і на швидких нейтронах, якщо в реакторі відсутній спеціальний сповільнювач. Навіть у цьому випадку деяке сповільнення відбувається і роль сповільнювача виконує саме ядерне паливо. В такому випадку нейтрони можуть сповільнитись лише до енергії 0,1 – 0,4 MeV. Ланцюгова реакція з такими нейтронами називається *швидкою*. Переріз такої реакції дуже малий, тому ланцюгова реакція з природним ураном на швидких нейтронах іти не може. Для того, щоб вона йшла необхідно збагатити ядерне паливо ізотопом ${}^{235}_{92}\text{U}$ до 15%. Ця реакція добре йде в атомній бомбі, де використання сповільнювача є складною задачею через зростання її маси.

Ланцюгова реакція іде в середовищі, в якому крім процесів сповільнення, дифузії і поглинання нейтронів відбувається також процес розмноження нейтронів. Таке середовище називається *активним*. *Активна зона* – це частина об'єму реактора, де знаходиться активне середовище. Нейтрони

народжуються, деякий час рухаються між ядрами і поглинаються певним ядром. Тому існує поняття *часу життя нейтрона*. Можна говорити про існування різних поколінь нейтронів, час життя яких дорівнює середньому часу життя нейтрона.

Середній час життя одного покоління нейтронів T залежить від властивостей активного середовища. Величина T лежить в межах 10^{-4} - 10^5 с для повільної реакції і 10^{-7} - 10^{-8} с – для швидкої.

Важливою характеристикою активного середовища є коефіцієнт розмноження нейтронів. Коефіцієнт розмноження k дорівнює відношенню кількості нейтронів в певному поколінні до їх кількості в попередньому поколінні. Під зміною поколінь тут треба розуміти нейтрони, які поглинаються ядрами, викликаючи їх поділ, і нейтрони, які утворились в результаті поділу.

Якщо в першому поколінні є N нейтронів, то в n -ному поколінні їх буде Nk^n . При $k = 1$ ланцюгова реакція іде стаціонарно, при $k < 1$ реакція згасає, а при $k > 1$ інтенсивність реакції наростає. При $k = 1$ режим називається критичним, при $k > 1$ – надкритичним, при $k < 1$ підкритичним.

Замість коефіцієнта розмноження нейтронів k для опису поведінки реактора використовується реактивність реактора

$$\rho = \frac{k - 1}{k}. \quad (3)$$

При $\rho < 0$ реакція гасне, при $\rho = 0$ іде стаціонарно, при $\rho > 0$ інтенсивність реакції наростає. Для реактора, в якому є тільки ядерне паливо і сповільнювач, повинно бути $\rho > 0$. Але в такому стані реактор вибухне. Тому надлишкова реактивність має бути скомпенсована стрижнями з кадмію або бору, що поглинають нейтрони. При наявності цих стержнів реактор може працювати стаціонарно при $\rho = 0$. Наявність позитивної початкової реактивності при відсутності поглинаючих стрижнів зв'язана з тим, що при роботі реактора в паливних стрижнях накопичуються продукти поділу ядер урану, які поглинають

нейтрони. Такими продуктами є $^{135}_{54}\text{Xe}$ і $^{149}_{62}\text{Sm}$ (для ^{135}Xe переріз поглинання теплових нейтронів дорівнює $3 \cdot 10^6 \text{ барн}$).

При роботі ядерного реактора утворюються радіонукліди, небезпечні для біологічних об'єктів. При штатній роботі реактора вони надійно зберігаються (крім допустимих робочих викидів) і після відпрацювання ядерного палива – утилізуються в сховищах. При розгерметизації активної зони під час ядерних аварій вони можуть поступати в навколишнє середовище і забруднювати його.

Різні радіонукліди при однакових кількостях становлять різну небезпеку. Згідно ОСП-72/87 (основні санітарні правила радіаційної безпеки) всі радіонукліди, як потенційні джерела внутрішнього опромінення, умовно розділені на 4 групи за радіотоксичністю (табл. 1). Для кожної групи *мінімально значима активність* (МЗА) має різне значення. МЗА – це найменша активність відкритого джерела радіоактивності на робочому місці, при якій необхідний дозвіл органів державного нагляду на використання цих джерел.

В залежності від групи токсичності згідно з нормами радіаційної безпеки (НРБ – 97) визначаються допустимі концентрації радіонуклідів в повітрі та воді, а також допустимі межі річного надходження в організм.

Згідно з законом радіоактивного розпаду активність A радіонуклідів з періодом напіврозпаду T і числом ядер N визначається за формулою:

$$A = \frac{\ln 2}{T} N. \quad (4)$$

Із співвідношення (4) випливає, що активність певного числа ядер N обернено пропорційна періоду напіврозпаду T . Застосуємо (4) для оцінки ступеня внутрішнього опромінення людини нуклідом. Ступінь опромінення прямо пропорційна до A , тому при $N = \text{const}$ (N – кількість радіоактивних ядер всередині організму) вона обернено пропорційна T . Але при зменшенні T зменшується можливість проникнення даного нукліду всередину організму, що призводить до зменшення N . Отже, на залежність A від T в результаті внутрішнього

Таблиця 1.

Класифікація радіонуклідів за відносною токсичністю

Група токсичності	Радіонукліди
А Особливо високотоксичні	$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, $^{210}\text{Pb}+^{210}\text{Bi}$, ^{210}Po , ^{211}At , ^{226}Ra +дочірні, ^{228}Ra , ^{227}Ac , трансуранові елементи
Б Дуже токсичні	^{45}Ca , ^{59}Fe , ^{89}Sr , ^{91}Y , $^{107}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$, $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{126}I , ^{129}I , ^{131}I , ^{134}Cs , $^{140}\text{Ba}+^{140}\text{La}$, ^{144}Ce , ^{144}Pr , ^{151}Sm , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{170}Tl , ^{207}Bi , ^{223}Ra , ^{228}Ac , ^{227}Th , ^{228}Th , ^{230}Th , ^{232}Th , ^{234}Th , ^{230}Pa , ^{231}Pa , ^{230}U до ^{238}U
В Середньотоксичні	^{14}C , ^{16}N , ^{22}Na , ^{31}Si , ^{32}P , ^{35}S , ^{36}Cl , ^{42}K , ^{47}Ca , ^{46}Sc , ^{47}Sc , ^{48}Sc , ^{48}V , ^{52}Mn , ^{64}Mn , ^{56}Mn , ^{55}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{59}Ni , ^{63}Ni , ^{65}Ni , ^{64}Cu , ^{65}Zn , $^{69\text{m}}\text{Zn}$, ^{72}Ga , ^{73}As , ^{74}As , ^{76}As , ^{77}As , ^{75}Se , ^{82}Br , ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{86}Rb , ^{88}Rb , ^{85}Sr , ^{89}Sr , ^{91}Sr , ^{92}Sr , ^{91}Y , ^{92}Y , ^{93}Y , $^{93}\text{Zr}+^{93}\text{Nb}$, $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$, ^{99}Mo , ^{96}Tc , $^{97\text{m}}\text{Tc}$, ^{97}Tc , ^{99}Tc , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{105}Rh , $^{103}\text{Pd}+^{103}\text{Rh}$, ^{109}Pd , ^{105}Ag , ^{111}Ag , $^{109}\text{Cd}+^{109}\text{Ag}$, ^{115}Cd , $^{115\text{m}}\text{Cd}$, $^{114\text{m}}\text{In}$, ^{113}Sn , ^{122}Sb , ^{124}Sb , ^{125}Sb , $^{125\text{m}}\text{Te}$, ^{129}Te , ^{132}Te , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{136}Cs , $^{137}\text{Cs}+^{137}\text{Ba}$, ^{131}Ba , ^{141}Ce , ^{143}Ce , ^{142}Pr , ^{143}Pr , ^{146}Nd , ^{149}Nd , ^{147}Pm , ^{153}Sm , $^{152\text{m}}\text{Eu}$, ^{155}Eu , ^{153}Gd , ^{159}Gd , ^{160}Tb , ^{166}Dy , ^{166}Ho , ^{169}Er , ^{171}Er , ^{171}Tl , ^{175}Yb , ^{177}Lu , ^{181}Hf , ^{182}Ta , ^{181}W , ^{185}W , ^{187}W , ^{183}Re , ^{186}Re , ^{188}Re , ^{191}Os , ^{190}Ir , ^{192}Ir , ^{194}Ir , ^{191}Pt , ^{193}Pt , ^{197}Pt , ^{196}Au , ^{198}Au , ^{199}Au , $^{197\text{m}}\text{Hg}$, ^{197}Hg , ^{203}Hg , ^{200}Te , ^{202}Te , ^{204}Te , ^{303}Pb , ^{212}Pb , ^{206}Bi , ^{231}Th , ^{233}Pa , ^{240}U
Г Помірнотоксичні	^3H , ^7Be , ^{13}N , ^{17}N , ^{18}F , ^{38}Ca , ^{37}Ar , ^{41}Ar , ^{51}Cr , $^{58\text{m}}\text{Co}$, ^{69}Zn , ^{71}Ge , ^{77}Kr , ^{85}Kr , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Rb , $^{85\text{m}}\text{Sr}$, $^{91\text{m}}\text{Y}$, ^{97}Nb , $^{96\text{m}}\text{Tc}$, ^{97}Ru , $^{103\text{m}}\text{Rh}$, $^{113\text{m}}\text{In}$, $^{115\text{m}}\text{In}$, ^{115}In , ^{129}Sb , ^{133}Te , $^{131\text{m}}\text{Xe}$, ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{131}Cs , $^{134\text{m}}\text{Cs}$, ^{139}Ba , ^{141}La , ^{142}La , ^{145}Ce , ^{145}Pr , ^{146}Pr , ^{144}Nd , ^{147}Sm , ^{165}Dy , ^{187}Re , $^{193\text{m}}\text{Pt}$, ^{201}Tl , природний U та Th

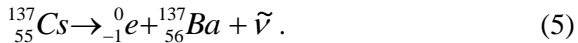
опромінення впливають два протилежно діючих фактори: Зменшення T , з однієї сторони, призводить до збільшення A , а з другої, – до зменшення N і загальної величини можливого

опромінення. Для радіонуклідів з періодом напіврозпаду, набагато більшим тривалості життя людини, загальний час опромінення і N не залежать від T . Для такого випадку, згідно з формулою (4), ступінь опромінення обернено пропорційний до T .

При великих аваріях, схожих на Чорнобильську, при розгерметизації першого контуру і часткового розплавлення активної зони, з реактора може відбуватись викидання радіонуклідів в навколишнє середовище. В основному, це у ран (^{235}U , $T = 4,5 \cdot 10^9$ років, група радіаційної небезпеки Г; ^{238}U , $T = 7,0 \cdot 10^9$ років, група радіаційної небезпеки Б) і продукти поділу ядер урану. Деякі з цих радіоактивних речовин мають особливе значення, оскільки вони можуть засвоюватись організмом людей і тварин та тривалий час викликати внутрішнє опромінення. При аварійних викидах найбільше практичне значення мають довгоживучі радіонукліди.

Коротка характеристика продуктів поділу ядер урану, які викидаються при розгерметизації активної зони.

1. $^{137}_{55}\text{Cs}$ (цезій) – вихід 6,15% (у % до актів поділу). Період напіврозпаду 30,2 років.

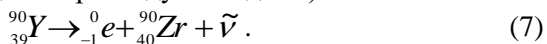


Випромінюються бета-частинки і гамма-фотони з енергією 661,6 кеВ. Нуклід відноситься до групи радіаційної небезпеки Б. Хімічний аналог калію, якого багато в м'яких тканинах живих організмів. Цезій може заміщати калій і викликати внутрішнє опромінення.

2. $^{90}_{38}\text{Sr}$ – вихід 5,77%. Цей ізотоп стронцію бета "-" - активний і має період напіврозпаду 28,8 років.

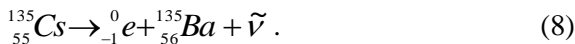


Ітрій ($^{90}_{39}\text{Y}$), який утворився при розпаді ^{90}Sr , також є бета "-" - активним (період напіврозпаду 64 години)



Система $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ випромінює тільки бета-частинки, частина яких має значну енергію (максимальна енергія бета-спектру ^{90}Y дорівнює $2,274\text{MeV}$). Стронцій відноситься до групи Б, а ітрій – до групи В радіаційної небезпеки. Стронцій – хімічний аналог кальцію, тому в організмі може замішувати його, накопичуючись в кістках і викликаючи опромінення червоного кістяного мозку, який є кровотворним органом. Наслідком такого опромінення може бути лейкоз.

3. $^{135}_{55}\text{Cs}$ – вихід 6,46%. Період напіврозпаду $2 \cdot 10^6$ р.



Випромінює тільки бета-частинки. Відноситься до групи радіаційної небезпеки В.

4. $^{131}_{53}\text{J}$ (йод) – вихід 2,93%. Період напіврозпаду 8,14 доби. Всі ізотопи йоду бета "-" - активні. Розпад йоду відбувається за схемою:

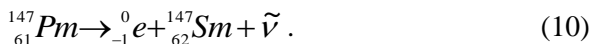


де $^{131}_{54}\text{Xe}$ – ксенон.

$^{131}_{53}\text{J}$ при розпаді випромінює бета- і гамма-випромінювання. Відноситься до групи радіаційної небезпеки Б. Особливо небезпечний в початковий період після аварії, оскільки має невеликий період напіврозпаду. Поширюється у вигляді аерозолі і, проникаючи через легені, накопичується в щитовидній залозі. Блокування щитовидної залози великою кількістю нерадіоактивного йоду дозволяє суттєво знизити її опромінення і можливості захворювання на рак.

5. $^{129}_{53}\text{J}$ – вихід 0,9%. Період напіврозпаду $1,7 \cdot 10^7$ років, реакція розпаду має вигляд (9). Має складний бета- і гамма-спектри, відноситься до групи радіаційної небезпеки Б.

6. $^{147}_{61}\text{Pm}$ (прометій) – вихід 2,38%. Період напіврозпаду 2,6 років.



де $^{147}_{62}\text{Sm}$ – самарій

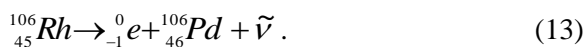
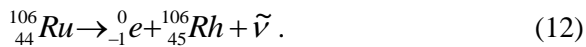
Випромінює бета- і гамма-випромінювання. Відноситься до групи радіаційної небезпеки В.

7. ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ (техніцій) – вихід 6,06%. Період напіврозпаду $2,1 \cdot 10^5$ років.



Випромінює тільки бета-частинки. Відноситься до групи радіаційної небезпеки В.

8. ${}^{106}_{44}\text{Ru} + {}^{106}_{45}\text{Rh}$ – вихід 0,38% (${}^{106}_{44}\text{Ru}$ – рутеній, ${}^{106}_{45}\text{Rh}$ – родій). Для цих елементів які фактично існують разом, оскільки період напіврозпаду рутенію-106 набагато більший ($T=1$ рік) від родію-106 ($T=30\text{с}$).



де ${}^{106}_{46}\text{Pd}$ – паладій.

Система ${}^{106}\text{Ru} + {}^{106}\text{Rh}$ випромінює складні бета- і гамма-спектри. Рутеній-106 відноситься до групи радіаційної небезпеки Б, а родій-106 – до групи радіаційної небезпеки Г.

При роботі ядерного реактора утворюється чимало трансуранових елементів ($Z \geq 93$), таких як ${}^{237}_{93}\text{N}$, ${}^{239}_{93}\text{N}$, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ та інших. Нептуній-239 має $T=2,4$ доби і відноситься до групи радіаційної небезпеки В. Плутоній-239 альфа-активний і має період напіврозпаду $2,4 \cdot 10^4$ років. Відноситься до групи радіаційної небезпеки А. Плутонію-239 утворюється в реакторі значна кількість. Так, наприклад, у легководному реакторі потужністю 1ГВт за один рік утворюється $143,7\text{кг}$ ${}^{239}\text{Pu}$ з загальною активністю 882Ки . Вміст нептунію-237 оцінюється в 1% від вмісту плутонію-239. Він є родоначальником радіоактивної родини нептунію.

При чорнобильській аварії, як і при інших подібних аваріях, радіонукліди, які викидаються, знаходяться при високій температурі в присутності кисню повітря. Тому ймовірно, що вони викидаються у вигляді окислів. При з'єднанні їх з водою утворюються розчини основ ${}^{137}\text{Cs} - \text{CsOH}$ та ${}^{90}\text{Sr} - \text{Sr}(\text{OH})_2$.

Розчинність $CsOH$ у воді дорівнює 25,8 моль/л, $Sr(OH)_2$ – 0,07 моль/л. Отже, розчинність $CsOH$ більше ніж у 250 разів перевищує розчинність $Sr(OH)_2$. Це сприяє значно швидшому вимиванню ^{137}Cs з ґрунту в порівнянні зі ^{90}Sr . В ґрунті відбуваються хімічні реакції вказаних вище основ зі складовими ґрунту. Якщо ґрунт збагачений кремнієм у вигляді двоокису SiO_2 , то цей двоокис реагує з основами, утворюючи силікати – солі кремнієвої кислоти, наприклад, Na_2SiO_3 . Силікати практично нерозчинні в воді. Такі хімічні процеси приводять до того, що частина радіонуклідів Cs і Sr закріплюються в ґрунті в нерозчинній формі. Отже, підводячи підсумок, можна чекати, що в даний момент, після більше 25 років аварії на ЧАЕС, в ґрунті ^{90}Sr повинен весь час знаходитись в майже нерозчинній формі і слабо вимиватись ґрунтовими водами. ^{137}Cs повинен бути, в основному, вимитий з ґрунту, але невелика його частина повинна закріпитись також в нерозчинній формі у вигляді силіката цезію.

Експериментальна методика визначення питомої активності

В лабораторній роботі досліджується ґрунт, відібраний поблизу м. Сарни. За допомогою спектрального аналізу визначено, що в ньому присутній ^{137}Cs в незначній кількості. В результаті виконання роботи необхідно визначити питому активність цього ґрунту, зумовлену Чорнобильськими викидами і встановити, чи відбувається вимивання радіоактивності водою з досліджуваного ґрунту. Частина відібраного ґрунту заливалась дистильованою водою і вистоявалась протягом декількох діб. Після цього вода зливалась, а ґрунт осушувався. Якщо визначені питомі активності промитого і непромитого водою ґрунту однакові, то радіоактивність досліджуваного ґрунту зумовлена в першу чергу ^{90}Sr . Якщо ж відбувається помітне вимивання, то це свідчить про вимивання ^{137}Cs .

Вимірювання здійснюється радіометром „Бета” (див. рис. 1). Питома активність проби визначається за формулою:

$$A = \frac{H - H_{\phi}}{P}, \quad (14)$$

де H – швидкість лічби радіометра (кількість відліків за одиницю часу) при завантаженні вимірюваної проби, 1/с; H_{ϕ} – швидкість лічби радіометра від фонової проби, 1/с; P – чутливість радіометра до даного радіонукліда, $\frac{\kappa\text{г}}{\text{с} \cdot \text{Бк}}$. Чутливість визначалась за зразковими пробами $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ і складає $1,16 \cdot 10^{-3} \kappa\text{г} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$.



Рис. 1. Радіометр „Бета”

Як фонову пробу в роботі використовують ґрунт, відібраний в цьому ж районі до Чорнобильської аварії.

Час вимірювання кількості відліків від досліджуваної проби t_n повинен відноситись до часу вимірювання кількості відліків від фонової проби t_{ϕ} згідно рівняння

$$\frac{t_n}{t_{\phi}} = \sqrt{\frac{H}{H_{\phi}}}, \quad (15)$$

де $H = N/t_n$ – швидкість лічби від досліджуваної проби; $H_{\phi} = N_{\phi}/t_{\phi}$ – швидкість лічби від фонової проби.

При виконанні цієї умови похибка буде мінімальною. Оскільки внесена в ґрунт активність мала, то $H \approx H_\phi$ і $t \approx t_n \approx t_\phi$. Тоді похибка визначення питомої активності проби:

$$\Delta A = \frac{1}{t \cdot p} \sqrt{(\Delta N)^2 + (\Delta N_\phi)^2}, \quad (16)$$

де ΔN – похибка вимірювання кількості відліків від досліджуваної проби; ΔN_ϕ – похибка вимірювання кількості відліків від фонові проби.

Хід роботи і обробка результатів вимірювань

1. Увімкнути радіометр „Бета” і встановити кнопкою на передній панелі режим 4 (час вимірювання $t=500c$). Прогріти прилад на протязі 10хв.
2. Заповнити кювету фонові пробою. Рівень наповнення не повинен бути вищий від країв кювети. Встановити кювету в нижні пази свинцевого будиночка і закрити його двері.
3. Виміряти число імпульсів від фонові проби N_ϕ 5 разів по 500с і результат записати в таблицю 2.

Таблиця 2.

Таблиця результатів вимірювань $t = 500c$

№ з/п	1	2	3	4	5	$N_{сер}$
N_ϕ (фонові проба)						
N_1 (проба невромитого ґрунту)						
N_2 (проба промитого ґрунту)						

4. Висипати фонову пробу у відповідну посудину. Заповнити кювету (на рівні країв) досліджувані непромийтим ґрунтом. Поставити кювету в будиночок, закрити дверці і повторити п. 3 для цієї проби.

5. Висипати фонову пробу у відповідну посудину. Заповнити кювету (на рівні країв) досліджуваним промитим ґрунтом. Поставити кювету в будиночок, закрити дверці і повторити п. 3 для цієї проби.
6. Вивантажити кювету у відповідну посудину. Промити кювету дистильованою водою. Привести в порядок робоче місце.
7. Вирахувати середні значення імпульсів N_ϕ , N_1 , N_2 . Вирахувати швидкості лічби для середніх значень фонові проби, проб непромитого та промитого ґрунтів H_ϕ , H_1 , H_2 .
8. За формулою (14) вирахувати питомі активності A_1 та A_2 проб непромитого та промитого ґрунтів.
9. Знайти абсолютні похибки вимірювання кількості відліків для фонові проби та проб непромитого та промитого ґрунтів ΔN_ϕ , ΔN_1 , ΔN_2 за формулою:

$$\Delta N = t_c \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{\text{сер}} - N)^2}{n(n-1)}}, \quad (17)$$

де n – кількість вимірів ($n=5$), t_c – коефіцієнт Стюдента (для $n=5$ він дорівнює 2,8).

10. За формулою (16) визначити абсолютні похибки питомої активності проб непромитого та промитого ґрунтів ΔA_1 , ΔA_2 .
11. Визначити відносні похибки питомої активності непромитого та промитого ґрунтів ε_1 та ε_2 за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%. \quad (18)$$

Записати результати вимірювань з похибками.

12. Зробити висновки: помітне чи непомітне забруднення ґрунту, якими радіонуклідами воно зумовлене, чи помітне вимивання радіоактивності.

Контрольні запитання

1. Яка ядерна реакція є джерелом енергії в ядерному реакторі? З якими ядрами вона відбувається?
2. Як відбувається ланцюгова ядерна реакція?
3. Яке ядерне паливо використовується на атомних електростанціях?
4. Що таке сповільнювач і для чого він використовується в ядерних реакторах?
5. Що таке активна зона і які процеси проходять в ній?
6. Охарактеризуйте групи токсичності радіонуклідів. Наведіть приклади надзвичайно високотоксичних, дуже токсичних, середньотоксичних та помірнотоксичних радіонуклідів. Що таке МЗА?
7. Що таке активність, питома активність та об'ємна активність? В яких одиницях вони вимірюються?
8. Назвіть основні радіонукліди, які надходять в навколишнє середовище при розгерметизації реактора. Які особливості розпаду цих нуклідів?
9. Пояснити будову та принцип роботи радіометра „Бета”.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3. ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМНОЇ АКТИВНОСТІ РАДОНУ В ПОВІТРІ

Мета роботи: вивчити методику і набути навичок з визначення об'ємної активності радіоактивних газів

Теоретичні відомості

Існує радіоактивність, яка зумовлена наявністю природних радіоактивних джерел. Одні з хімічних елементів цих джерел були наявні ще при утворенні гірських порід ($4,6 \cdot 10^9$ років тому), інші – результат взаємодії космічного випромінювання з атомами атмосфери. Перші мають великий період напіврозпаду, співмірний з часом існування Землі і утворюють разом зі своїми радіоактивними продуктами розпаду

ланцюжки, які називаються радіоактивними родинами. Таких родин є 4: родина урану, де родоначальником є ^{238}U (період напіврозпаду $T_{1/2}$ становить $4,5 \cdot 10^9$ років), родина торію (^{232}Th з $T_{1/2} = 1,39 \cdot 10^{10}$ років), родина актиноурану (^{235}U з $T_{1/2} = 7,1 \cdot 10^8$ років) і родина нептунію (^{237}Np з $T_{1/2} = 2,2 \cdot 10^6$ років).

За розповсюдженням в природі уран займає 38 місце. Його вміст в земній корі становить $4 \cdot 10^{-4} \%$ (за масою). Він знаходиться в гірських породах, ґрунті $(1,2 \div 9,3) \cdot 10^{-5} \%$, в річках і в морях $(5 \cdot 10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-8} \%)$, в океані $(10^{-7} \%)$. Родина ^{238}U в природному урані складає 99,27%. Схеми розпадів членів родини представлені на рис.1. В цій родині є радіонукліди ^{226}Ra і ^{210}Pb , що за своїми хімічними властивостями ідентичні Ca і можуть заміщувати його при формуванні кісткової маси живих організмів. В родині торію утворюється ізотоп радію – ^{224}Ra , а в родині актиноурану – ^{223}Ra . Ці ізотопи радію також хімічно ідентичні кальцію. В результаті α -розпаду радію утворюється радіоактивний газ радон (^{222}Rn з $T_{1/2} = 3,82$ доби в родині урану, ^{220}Rn , з $T_{1/2} = 54,5\text{с}$ в родині торію і ^{219}Rn в родині з $T_{1/2} = 3,92\text{с}$ актиноурану). ^{220}Rn ще називають торон, а ^{219}Rn – актинон. Ізотопи радону α -активні і розпадаються за загальною схемою



Торон і актинон дуже швидко розпадаються і тому концентрація їх в повітрі незначна.

Продукти розпаду ізотопів радону радіоактивні і мають порівняно малі періоди напіврозпаду. Розглянемо ланцюжок розпадів ^{238}U (рис. 1), куди входить $^{222}_{86}\text{Rn}$, який є важливим фактором внутрішнього опромінення населення за рахунок природної радіоактивності. В ланцюжку розпадів

випромінюються не тільки альфа- і бета-частинки, а і гамма-кванти.

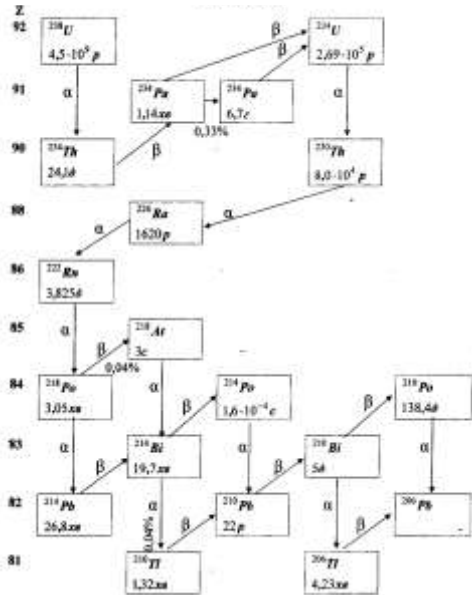


Рис. 1.Родина ^{238}U

Радон, при диханні попадає в легені людини разом із повітрям. В легенях відбувається радіоактивний розпад радону і його продуктів. Це призводить до внутрішнього опромінення органів альфа- і бета-частинками, а також і гамма-квантами, спричиняючи онкологічні захворювання. Відомо, що річна еквівалентна доза від природних джерел в районах з нормальним радіоактивним фоном становить 0,60мЗв/рік при зовнішньому опроміненні, а вклад елементів родини урану – 0,090мЗв/рік. При внутрішньому опроміненні річна еквівалентна доза становить 1,34мЗв/рік, а вклад членів родини урану в ній – 0,954мЗв/рік, причому вклад радону – 0,930мЗв/рік. Якщо ж врахувати, що сумарна річна еквівалентна доза від зовнішнього і внутрішнього опромінення становить приблизно 1,952мЗв/рік,

то вклад в ній членів родини урану становить 52%, а радону – 46,7%.

Радон частково звільняється з земної кори, де він утворюється внаслідок розпаду радію і виходить в повітря. Процес виходу радону в повітря називають його емануванням, а сам радон – еманацією. Його концентрація в повітрі суттєво відрізняється для різних точок земної кулі. Середня об'ємна активність радону на поверхні Землі у відкритому повітрі дорівнює 2Бк/м^3 . Особливо великі виділення радону з земної кори відбуваються в тих місцях, де є поклади урану і торію.

Внаслідок того, що радон в 7,5 разів важчий за повітря він накопичується в низинах, підвальних приміщеннях, копальнях, на перших поверхах будинків, які слабо провітрюються.

Значний експериментальний матеріал по радону був зібраний НКДАР ООН (науковий комітет по дії атомної радіації). За його даними в приміщеннях концентрація радону приблизно у 8 разів вища, ніж у вільному повітрі. Збільшення концентрації відбувається за рахунок накопичення за тривалий час. Так, за даними Фінляндії радіоактивність в приміщеннях, зумовлена радоном води, має наступні значення: ванна кімната – 8500Бк/м^3 , кухня – 3000Бк/м^3 , житлові кімнати – 200Бк/м^3 . Особливо велика концентрація радону в печерах і шахтах. Провітрювання приміщень приводить до значного зменшення концентрації радону в повітрі. Так, вимірювання показали, що в закритому приміщенні за 18 год. об'ємна активність радону збільшиться з 120Бк/м^3 до 650Бк/м^3 . Відкриття вікон на 2 – 3 години знижувало активність до 120Бк/м^3 .

В приміщення радон може потрапити не тільки з ґрунту, а і з будівельних матеріалів. Вони мають помітну кількість радію і торію, що приводить до еманування радону в приміщення. За вмістом цих радіоактивних елементів будівельні матеріали поділяються на маловмісні (дерево, цегла, бетон), середньовмісні (граніт, пемза) і високовмісні (глиноземи, кальцій-силікатний шлак, фосфогіпс, цегла з червоної глини, доменний шлак, зольний пил). Так, дослідники показали, що велика питома активність ^{226}Ra в наступних матеріалах:

глиноземи Швеції (1367Бк/кг), кальцій силікатний шлак США (2140Бк/кг), фосфогіпс ФРН (574Бк/кг).

Радон добре розчинний в воді і в розчиненому вигляді може переноситись водою. При нагріванні розчинність радону в воді зменшується і він виділяється в газоподібному вигляді. В Канаді проводились дослідження по вимірюванню зміни концентрації радону при користуванні душовими приміщеннями. Так, при рівні об'ємної активності радону в ванній кімнаті 148Бк/м³, після семихвилинного користування душем вона зросла до 4400Бк/м³, а після 22-хвилинного – до 5500Бк/м³.

Радон проникає в родовища природного газу, там накопичується і разом з газом попадає в кухонні приміщення, що призводить до збільшення його концентрації.

Аналіз різних джерел проникнення радону в приміщення дозволяє оцінити вклад кожного джерела за одну добу: будівельні матеріали і ґрунти під будинком – 60кБк, навколишнє повітря – 10кБк, вода – 4кБк, газ – 3кБк.

До значного підвищення концентрації радону всередині приміщень можуть привести заходи, напрямлені на економію тепла. При герметизації будинків пластиковими вікнами і дверима провітрюваність їх зменшується, що приводить до збільшення рівня концентрації радону в приміщеннях. Згідно даних НКДАР ООН, у 1982р. в Швеції, де будинки герметизують особливо ретельно, забудова малоповерхова і значна еманация радону з ґрунту, об'ємна активність радону в 30% будинків перевищувала 100Бк/м³, а в частці будинків від 0,01% до 0,1% складала від 1000 до 10000Бк/м³.

Під час розпаду радону в повітрі дочірні продукти адсорбуються пилинками та іонами, тобто утворюється радіоактивний аерозоль. У випадку пропускання його через фільтр, в залежності від ефективності фільтру, на ньому виділяються частинки радіоактивного аерозолю.

Ефективність фільтра η можна визначити за формулою

$$\eta = (C_0 - C_h) / C_0 = 1 - e^{-K_\phi \cdot h}, \quad (2)$$

де C_0 і C_h – концентрації частинок аерозолію до та після фільтру відповідно, h – товщина фільтру, K_ϕ – коефіцієнт фільтрації, який дорівнює відносній зміні концентрації радіоактивних речовин на одиницю товщини фільтру. Ефективність фільтру може бути знайдена експериментально за активністю A частинок, які осіли на два фільтри однакової товщини, розміщені один за одним

$$\eta = 1 - A_2 / A_1, \quad (3)$$

де A_1 і A_2 – активності частинок, що осіли на першому і другому фільтрах відповідно.

Для розрахунку значень A_1 і A_2 застосуємо закон радіоактивного розпаду у вигляді

$$dN / dt = -\lambda N, \quad (4)$$

де λ – стала розпаду.

Розглянемо накопичення активності продуктів розпаду $^{222}_{86}\text{Rn}$ на фільтрі, через який пропускають повітря з об'ємною швидкістю ω , що має у своєму складі радон і продукти його розпаду (див. рис. 1). Нехай N_{Po} , N_{Pb} , N_{Bi} – кількості атомів Po , Pb , Bi , що осіли на фільтрі за час прокачування t . Згідно (4) зміна кількості цих атомів за одиницю часу дорівнює

$$\begin{cases} \frac{dN_{Po}}{dt} = n_{Po}\omega\eta - \lambda_{Po}N_{Po} \\ \frac{dN_{Pb}}{dt} = n_{Pb}\omega\eta + \lambda_{Po}N_{Po} - \lambda_{Pb}N_{Pb} \\ \frac{dN_{Bi}}{dt} = n_{Bi}\omega\eta + \lambda_{Pb}N_{Pb} - \lambda_{Bi}N_{Bi} \end{cases} \quad (5)$$

де n_{Po} , n_{Pb} , n_{Bi} – концентрація ізотопів Po , Pb , Bi в повітрі.

Кожне рівняння (5) відображає той факт, що накопичення продуктів розпаду відбувається як внаслідок безпосереднього його вловлювання повітрям, так і внаслідок розпаду попереднього продукту. Передбачається, що атом радону фільтром не вловлюється, а продукти його розпаду існують лише у вигляді аерозолів.

Будемо вважати, що до початку прокачування повітря через фільтр на ньому не було радіоактивних атомів, тобто для $t = 0$ $N_{Po} = N_{Pb} = N_{Bi} = 0$.

Розв'язавши систему рівнянь (5), отримаємо:

$$\begin{cases} N_{Po} = \frac{n_{Po}\omega\eta}{\lambda_{Po}} F_{A_1}, \\ N_{Pb} = \frac{n_{Po}\omega\eta}{\lambda_{Pb}} F_{B_1} + \frac{n_{Pb}\omega\eta}{\lambda_{Pb}} F_{B_2}, \\ N_{Bi} = \frac{n_{Po}\omega\eta}{\lambda_{Bi}} F_{C_1} + \frac{n_{Pb}\omega\eta}{\lambda_{Bi}} F_{C_2} + \frac{n_{Bi}\omega\eta}{\lambda_{Bi}} F_{C_3}, \end{cases} \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} F_{A_1} &= 1 - e^{-\lambda_{Po}t}, \quad F_{B_1} = 1 - \frac{\lambda_{Pb}}{\lambda_{Pb} - \lambda_{Po}} e^{-\lambda_{Po}t} + \frac{\lambda_{Po}}{\lambda_{Pb} - \lambda_{Po}} e^{-\lambda_{Pb}t}, \quad F_{B_2} = 1 - e^{-\lambda_{Pb}t}, \\ F_{C_1} &= 1 - \frac{\lambda_{Pb}\lambda_{Bi}e^{-\lambda_{Po}t}}{(\lambda_{Pb} - \lambda_{Po})(\lambda_{Bi} - \lambda_{Po})} + \frac{\lambda_{Po}\lambda_{Bi}e^{-\lambda_{Pb}t}}{(\lambda_{Pb} - \lambda_{Po})(\lambda_{Bi} - \lambda_{Pb})} - \frac{\lambda_{Po}\lambda_{Pb}e^{-\lambda_{Bi}t}}{(\lambda_{Bi} - \lambda_{Po})(\lambda_{Bi} - \lambda_{Pb})}, \\ F_{C_2} &= 1 - \frac{\lambda_{Bi}}{\lambda_{Bi} - \lambda_{Pb}} e^{-\lambda_{Pb}t} + \frac{\lambda_{Pb}}{\lambda_{Bi} - \lambda_{Pb}} e^{-\lambda_{Bi}t}, \quad F_{C_3} = 1 - e^{-\lambda_{Bi}t}. \end{aligned} \quad (7)$$

Якщо у повітрі, яке аналізується, є рівновага між дочірніми продуктами розпаду радону, то

$$\lambda_{Po}n_{Po} + \lambda_{Pb}n_{Pb} + \lambda_{Bi}n_{Bi} = A_0, \quad (8)$$

де A_0 – концентрація активності радону в повітрі.

Розглянемо зміну активності продуктів розпаду радону внаслідок їх природної радіоактивності після припинення прокачування повітря.

Нехай N'_{Po} , N'_{Pb} , N'_{Bi} – кількості атомів відповідних нуклідів на фільтрі через час t' після припинення прокачування повітря. Тоді відповідна система рівнянь прийме вигляд

$$\begin{cases} \frac{dN'_{Po}}{dt'} = -\lambda_{Po}N'_{Po}, \\ \frac{dN'_{Pb}}{dt'} = -\lambda_{Pb}N'_{Pb} + \lambda_{Po}N'_{Po}, \\ \frac{dN'_{Bi}}{dt'} = -\lambda_{Bi}N'_{Bi} + \lambda_{Pb}N'_{Pb}. \end{cases} \quad (9)$$

Якщо попередньо через фільтр прокачували повітря протягом часу t , то при $t' = 0$ на фільтрі було $N_{Po}(t)$, $N_{Pb}(t)$, $N_{Bi}(t)$ атомів. Тоді початкові умови для (9) виглядатимуть так:

$$N'_{Po}(0) = N_{Po}(t), \quad N'_{Pb}(0) = N_{Pb}(t), \quad N'_{Bi}(0) = N_{Bi}(t). \quad (10)$$

Значення $N_{Po}(t)$, $N_{Pb}(t)$, $N_{Bi}(t)$ можна визначити з виразів (6) та (7).

Розв'язок системи (8) за початкових умов (10) можна знайти аналогічно до розв'язку (6) системи (5) і визначити $N'_{Po}(t')$, $N'_{Pb}(t')$, $N'_{Bi}(t')$. Але для практики важливіше знати кількість атомів певного радіоактивного ізотопу, що розпадається за проміжок часу t' . Позначимо кількість атомів M і згідно закону(4) запишемо

$$M = \int_0^{t'} \lambda N' dt'. \quad (11)$$

Відповідно до (6) розв'язок системи (9) можна записати так

$$\begin{cases} M_{Po} = N_{Po}(t)F'_{A_1} \\ M_{Pb} = N_{Po}(t)F'_{B_1} + N_{Pb}(t)F'_{B_2} \\ M_{Bi} = N_{Po}(t)F'_{C_1} + N_{Pb}(t)F'_{C_2} + N_{Bi}(t)F'_{C_3} \end{cases} \quad (12)$$

Тут значення F'_i дорівнюють F_i для часу t' , що пройшов з моменту припинення прокачування повітря.

З рівнянь (7), (8) і (12) для випадку рівноваги між продуктами розпаду знайдемо A_0 :

$$A_0 = \frac{M_{Bi}}{\omega \eta F}, \quad (13)$$

де

$$F = \frac{F'_{A_1} F'_{C_1}}{\lambda_{Po}^2} + F'_{C_2} \left(\frac{F_{B_1}}{\lambda_{Po} \lambda_{Pb}} + \frac{F_{B_2}}{\lambda_{Pb}^2} \right) + F'_{C_3} \left(\frac{F_{C_1}}{\lambda_{Po} \lambda_{Bi}} + \frac{F_{C_2}}{\lambda_{Pb} \lambda_{Bi}} + \frac{F_{C_3}}{\lambda_{Bi}^2} \right).$$

Опис експериментальних установок

Вимірювання проводились на експериментальній установці, блок-схема якої зображена на рис. 2.

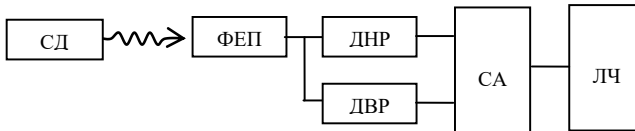


Рис.2. Блок-схема вимірювальної установки

Тут СД÷ФЕП – сцинтиляційний детектор і фотоелектронний помножувач; ДНР÷ДВР – дискримінатори нижнього і верхнього рівня енергій γ -квантів, що реєструються приладом. ДНР÷ДВР разом із СА (схемою антиспівпадань) налаштовані на реєстрацію γ -лінії ^{214}Bi з енергією $E_\gamma = 0,609 \text{ MeV}$ (квантовий вихід 0,46), ЛЧ – лічильник імпульсів. У «енергетичне вікно» дискримінаторів потрапляє також лінія ^{137}Cs з енергією $E_\gamma = 0,6616 \text{ MeV}$ (квантовий вихід 0,885). Це дає можливість градуювання установки за активністю, використовуючи джерело ^{137}Cs , активність якого відома.

Оскільки установка рахує лише імпульси у вузькому енергетичному діапазоні, то це зменшує кількість імпульсів фону, а значить збільшує точність вимірювань.

Світлосила установки визначається за формулою $L(E) = N_{Bi} / (M_{Bi} \cdot K)$, де N_{Bi} – число імпульсів від ядер ^{214}Bi за певний час, M_{Bi} – число розпадів ядер ^{214}Bi за той же час, K – квантовий вихід.

Цезієве джерело для градування установки за активністю має ті ж геометричні розміри і так само розміщене по відношенню до детектора, як і аерозольний фільтр. Тому для нього, $L(E) = N_{Cs} / (A_{Cs} \cdot \tau \cdot K_{Cs})$ де N_{Cs} – кількість імпульсів, зареєстрованих від цезієвого джерела, A_{Cs} – активність цезієвого джерела, τ – час вимірювання кількості імпульсів, K_{Cs} – квантовий вихід цезієвого джерела.

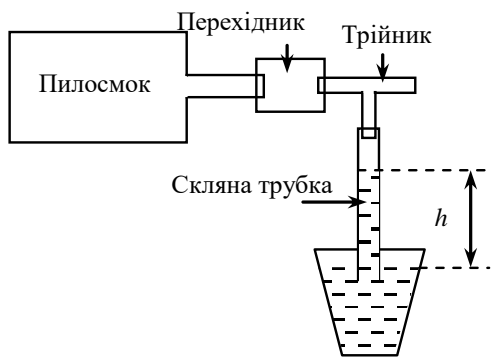


Рис. 3. Схема прокачування повітря

Знаючи A_{Cs} і визначивши N_{Cs} за значенням $L(E)$ і виміряному значенню N_{Bi} можна знайти M_{Bi} і далі за виразом (13) обчислити об'ємну активність радону A_{Rn} . Оскільки коефіцієнт F залежить від часу, то для обчислення A_{Rn} було використано розроблену доцентом кафедри фізики, к.ф.-м. наук Троцюком М. Й. комп'ютерну програму.

Накачку активності на фільтр проводиться за рахунок прокачування пілосмоком повітря через фільтр, виготовлений із тканини на основі льону на протязі 300с.

Визначення об'ємної швидкості прокачування повітря ω проводиться за допомогою установки, показаній на рис. 3. У вхідну трубу пілосмока через перехідник вставляється трійник, один відвід якого приєднується до скляної трубки, опущеної в посудину з водою.

Об'ємна швидкість повітря дорівнює $\omega = S \cdot v$, де S – площа поперечного перерізу вхідної труби пілосмока, v – швидкість руху повітря у вхідній трубі. Швидкість v визначається за тиском повітря у вхідній трубі на основі рівняння *Бернуллі*

$$\rho_n v^2 / 2 + \rho_n gh + p = \text{const}, \quad (14)$$

де ρ_n – густина повітря.

Розглянемо два перерізи трійника. Для них різниця тисків повітря дорівнює $\Delta p = \rho_e gh$, де ρ_e – густина води.

Прирівнявши (14) для двох виходів трійника і знехтувавши незначними доданками, отримаємо $\rho_e gh = \rho_n v^2 / 2$ звідки,

$$v = \sqrt{2\rho_e gh / \rho_n}. \quad (15)$$

Хід роботи

1. Початкові установки на лічильному пристрої: кнопка “Проверка” – відтиснута; перемикач виду робіт в положенні “N”; перемикач полярності імпульсів – в положенні негативного імпульса “ \sqcup ”; перемикач “Вывод” – в положенні “Однократно”; перемикач “Генератор” – в положенні “Внутренний”; перемикач “Управление” – в положенні “Автоматическое”; перемикач “Экспозиция” – в положенні необхідного часу експозиції.
2. Вмикнути прилади установки і прогріти на протязі 30хв.
3. Виміряти штангенциркулем внутрішній діаметр вхідної труби трійника d (див. рис. 3). Визначити площу перерізу вхідної труби $S = \pi d^2 / 4$.
4. На вхідну трубу трійника закріпити фільтр з двох шарів тканини.
5. Після прогрівання установки заміряти 3 рази її фон при закритому контейнері протягом часу t' , заданому викладачем (зазвичай це 1000с). Визначити середнє значення фону $N_{\text{фс}}$. Результати записати в таблицю 1.

Таблиця 1.

	$t' =$	$c,$	$t =$	c
N_ϕ				$N_{\phi c} =$
$h, \text{ мм}$				$h_c =$
N'_{Cs}				$N'_{Csc} =$

- Ввімкнути пиломок і прокачати повітря через фільтр на протязі часу t , заданого викладачем ($1000c$).
- При прокачуванні час від часу знімати різницю рівнів води водяного манометра h і результати записувати в таблицю 1.
- Після закінчення часу прокачування вимкнути пиломок.
- Швидко зняти верхній шар тканини з фільтра і покласти його в захисний контейнер на поверхню детектора.
- Проекспонувати верхній шар тканини фільтра на протязі часу t' . Заміряти число імпульсів N'_{c1} .
- Закріпити на кінці вхідної труби знову фільтр з двох шарів тієї ж, але нової тканини і виконати п. 5-8.
- Швидко зняти нижній шар тканини з фільтра і покласти його в захисний контейнер на поверхню детектора.
- Проекспонувати нижній шар тканини фільтра на протязі часу t' . Виміряти число імпульсів N'_{c2} .
- Покласти в захисний контейнер на поверхню детектора цезієве джерело з відомою активністю і за час експозиції t' виміряти 3 рази число імпульсів N'_{Cs} . Визначити середнє значення N'_{Csc} . Результати записати в таблицю 1.

Обробка результатів вимірювань

- Підставляючи середнє значення висоти водяного стовпчика h_c визначити швидкість повітряного потоку v за формулою (15).
- За формулою $\omega = S \cdot v$, де S – площа поперечного перерізу вхідної труби пиломка, знайти об'ємну швидкість повітряного потоку.

- Знайти середні значення відліків (добуток активності на час експозиції) без фону для різних шарів тканини (з точністю до часу): $A_1 = N_{c1} = N'_{c1} - N_{\phi c}$ і $A_2 = N_{c2} = N'_{c2} - N_{\phi c}$. За формулою (3) знайти ефективність фільтра одним шаром тканини η .
- Знайти $N_{Cs} = N'_{Csc} - N_{\phi c}$.
- Використовуючи величину $N_{Bi} = N_{c1}$ і $\tau = t'$ за формулами $L(E) = N_{Bi} / (M_{Bi} \cdot K)$ і $L(E) = N_{Csc} / (A_{Cs} \cdot \tau \cdot K_{Cs})$ знайти величину M_{Bi1} , отриману на основі експозиції верхньої тканини фільтра.

$$M_{Bi1} = \frac{N_{Bi} \cdot A_{Cs} \cdot t' \cdot K_{Cs}}{K \cdot N_{Csc}}, \quad (16)$$

де в даній роботі $A_{Cs} = 5Бк$; $K_{Cs} = 0,885$; $K = 0,46$.

- Використовуючи величину $N_{Bi} = N_{c2}$ аналогічно знайти величину M_{Bi2} , отриману на основі експозиції нижньої тканини фільтра. Оскільки на нижню тканину фільтра попадає повітря з меншою концентрацією аерозолів в результаті фільтрації верхньою тканиною, то результат (16) потрібно збільшити в $\frac{1}{1-\eta}$ разів.
- Внести значення M_{Bi1} і M_{Bi2} в розрахункову програму і визначити об'ємну активність радону в повітрі A_{01} і A_{02} .
- Знайти середнє значення концентрації радону в повітрі. Зробити висновки.

Контрольні запитання

- Записати і пояснити закон радіоактивного розпаду. Який зв'язок між постійною радіоактивного розпаду і періодом напіврозпаду?
- Що таке активність, об'ємна активність, питома активність? В яких одиницях вони вимірюються?

3. Які Ви знаєте радіоактивні родини? Назвіть основні особливості кожного з них?
4. Як утворюється радон? Зобразіть відповідні реакції. Які існують ізотопи радону?
5. Який вид розпаду характерний для ізотопів радону? Відтворіть реакції.
6. Яка роль радону у формуванні природного фону?
7. Чому радон особливо небезпечний для здоров'я людини? Які негативні наслідки він викликає?
8. Назвіть шляхи надходження радону в приміщення. Коротко охарактеризуйте їх.
9. Намалюйте блок-схеми робочих установок і поясніть принцип їх роботи.

Література

1. Лебедь О.О., Галатюк Ю. М., Гульчук В. А. Радіоактивність у природі, техніці та житті людини : навчальний посібник. Рівне : Волинські обереги, 2018. 216 с.
2. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика. М. : Наука, 1980. 729 с. URL: <http://hep.msu.dubna.ru/main/mod/resource/view.php?id=423> (дата звернення: 10.04.2020).
3. Лошилов Н. А., Немец О. Ф. Поярков В. А. Основы сельскохозяйственной радиологии. К. : Урожай, 1991. 471с.
4. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. М. : Энергоатомиздат, 1987. 188 с.
5. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ - 97). Державні гігієнічні нормативи. Київ : Відділ поліграфії Українського центру держсанепіднагляду МОЗ України, 1997. 121 с. URL: <http://www.insc.gov.ua/docs/nrbu97.pdf> (дата звернення: 10.04.2020).
6. Абрамов А. И., Казанский Ю. А., Матусевич Е. С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М. : Энергоатомиздат, 1985. 485 с. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/books/b/b001.pdf> (дата звернення: 10.04.2020).

7. Иванов В. И. Курс дозиметри. М. : Энергоатомиздат, 1988. 400 с.
8. Волков Н. Г., В. А. Христофоров, Н. Н. Ушаков. Методы ядерной спектрометрии. М. : Энергоатомиздат, 1990. 255 с.
URL: <https://ru.b-ok2.org/book/2522328/4fe0c8> (дата звернення: 10.04.2020).
9. Троцюк М. Й. Основи радіаційної фізики, дозиметрії і радіометрії. Конспект лекцій. Ч. 1-5. Рівне, 1998-2001.

Приклад оформлення титульної сторінки

НУВГП

Кафедра хімії та фізики

Звіт

***з лабораторної роботи №
Визначення питомої активності ґрунту,
забрудненому чорнобильськими викидами
 β –радіонуклідів***

***Виконав:
ст. ПМ-31
Яковчук А.Б.
Перевірив:
Лебедь О.О.***

Рівне 2020 р.

Приклад оформлення звіту

1. Мета роботи: ознайомитися та засвоїти методику визначення питомої активності ґрунтів за допомогою бета-радіометра “Бета”.

2. Робоча формула:

$$A = \frac{H - H_{\phi}}{P},$$

H – швидкість лічби радіометра (кількість відліків за одиницю часу) при завантаженні вимірюваної проби, 1/с;

H_{ϕ} – швидкість лічби радіометра від фонової проби, 1/с; P – чутливість радіометра до даного радіонукліда, $\frac{\text{кЗ}}{\text{с} \cdot \text{Бк}}$.

Для радіометра “Бета” $P = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кЗ} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$.

3. Результати вимірювань:

$t = 500 \text{ с}$

№ n/n	1	2	3	4	5	$N_{\text{сер}}$
N_{ϕ} (фонові проба)						
N_1 (проба непромитого ґрунту)						
N_2 (проба промитого ґрунту)						

4. Обробка результатів вимірювань

5. Кінцевий результат